

주름관에서의 압력강하와 마찰손실 계측에 관한 연구

윤영선* · 강준원* · 유재석** · 김현정†

The study on the measurement for the pressure drop and friction factor of corrugated metal pipes

Yongsun Yun*, Junone Kang*, Jaisuk Yoo** and HyungJung Kim†

Abstract. The data for friction factor of the pipe correlated by Reynolds number and relative roughness have been reported well as a Moody chart. However, the results for corrugated shapes have been not investigated sufficiently. In this research, therefore, the pressure drop and friction factor are obtained. Flexible metal tubes with corrugations for the measurement are made of stainless steel plates. The kinds of tubes for the measurement are 5 annular types and helical types. The pressure drop & the velocity of the flow are obtained by micromanometer & digital pressure sensor, supplying dry air at several steps. Then the pressure drop is calculated for each tube, using the obtained data. The result shows that the pressure drop is strongly influenced by the viscous dissipation of kinetic energy due to the circulation of flows, rather than a viscous friction loss. The pressure drop increased consistently as the Reynolds number increases.

Key Words : Corrugation(주름), Friction factor(마찰계수), Moody chart(무디선도), Pressure drop(압력강하)

기호설명

- A: 단면적
- \bar{V} : 평균유속
- D_h : 수력직경
- D: 직경
- P: 압력
- ρ : 밀도
- μ : 점성계수
- γ : 비중량
- f: 마찰계수
- a~e: 속도장 곡선맞춤 계수
- h_L : 수두손실
- r: 반지름

1. 서 론

유체 시스템 설계에 있어서 최소한의 에너지로 많은 유체를 이송하는 것은 설계 시 가장 고려되어야 할 부분이다. 이를 위해 시스템에 사용되는 요소들의 유체역학적 특성을 파악하는 것은 설계자에게 있어 매우 중요한 부분이다. 이러한 유체 배관 시스템 구축을 위한 다양한 요소들이 개발되어 있으며, 각각의 비용, 압력손실, 설치의 편리함을 추구하여 왔다.

전통적인 배관 시스템 설계에 있어서는 강한 내식성을 가지는 동관과 비용이 저렴한 강관 그리고 화학공업의 발달로 PVC나 PPC 등의 플라스틱 재료들이 사용되어왔다. 그러나 이러한 재료들은 설치 시 용접이나 용융접합 등의 방법을 사용해야 하며 복잡한 형상의 관로 설계 시 많은 비용과 시간을 발생시킨다는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하여 설치 및 가공의 용이함을 장점으로 하는 주름관이 자동차 내부의 좁은 공간부터 스프링 쿨러 및 보일러 배관에 이르기 까지 광범위하게 사용되고 있으나 이에 대한 유체역학적 데이터는 보고된바 없다. 다른 재료들에

†아주대학교 기계공학과
E-mail : hyunkim@ajou.ac.kr

*아주대학교 기계공학과 대학원

**아주대학교 기계공학부

관한 유체역학적 데이터는 상대 조도를 측정하면 Moody chart⁽¹⁾를 통하여 비교적 손쉽게 구할 수 있으나 이는 원형 직관에 국한된 것이며 상대조도 또한 일정 이상 비율을 넘어서거나 불규칙한 경우 Moody chart를 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 직관 형태를 벗어남으로서 기존의 Moody chart를 적용하기 어려운 주름관에 대한 손실요소를 측정하여, 주름관을 이용한 관로 설계 시 필요한 유체 역학적 데이터를 마련하고자 한다.

2. 이 론

2.1 유량과 Reynolds number

직관의 Moody chart를 작성하기 위해서는 해당 관의 규격과 작동 유체의 물성값(ρ, μ) 이외에도 실험을 통한 Re (Reynolds number), ΔP (압력강하) 등의 데이터가 필요하다. Reynolds number는 작동 유체의 특성과 관 내부에서의 평균유속(\bar{V}), 그리고 해당 관의 지름(D)을 측정함으로써 식 (1)과 같이 구할 수 있다⁽²⁾.

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (1)$$

일반적인 직관의 경우 지름(D)이 일정하나 주름관의 경우 안지름과 바깥지름이 각각 따로 존재한다. 일종의 수력 직경과 비슷한 의미로서 Fig. 1과 같이 안지름과 바깥지름의 평균값을 직경으로 정하였다.

$$D_h = \frac{D_{in} + D_{out}}{2} \quad (2)$$

주름관내에 흐르는 유체의 유량을 구하기 위해 주름관으로 유입되기 직전의 유속을 Fig. 2와 같이 유동이 통과하는 단면적 위의 5개의 점에서 측정하여

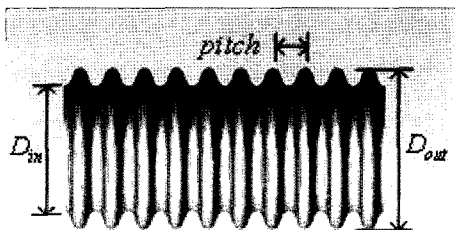


Fig. 1. Average diameter of flexible metal tube.

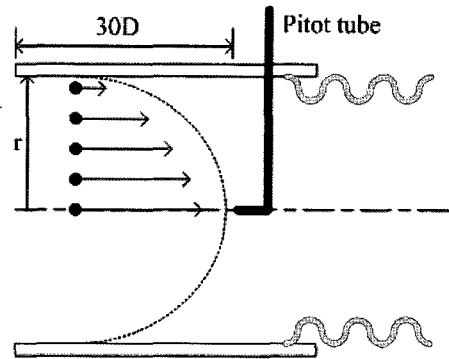


Fig. 2. Velocity acquisition point.

다음과 같은 적분을 통해 유량데이터를 획득하고 이를 이용하여 평균 유속을 식 (3)과 같이 구하는 방법을 사용하였다.

$$Q = 2\pi \int_0^r (ar^4 + br^3 + cr^2 + dr + e) r dr$$

$$\bar{V} = Q / \pi r^2 \quad (3)$$

Fig. 2에서 나타낸 5가지 위치(반지름 r 이 각각 $0, \frac{1}{5}r, \frac{2}{5}r, \frac{3}{5}r, \frac{4}{5}r$ 이 되는 지점)에서 측정된 속도 데이터 1, 2, 3, 4, 5를 Golden software Grapher 4 프로그램을 통하여 발달된 속도장의 곡선식을 구하고, 이를 적분하여 유량을 산출 한 뒤 관의 단면적으로 나누어 평균 유속을 구하였다.

관 내부를 흐르는 유체가 정상상태일 경우 관으로 유입되는 유량은 관을 빠져나오는 유량과 동일하므로 식 (3)은 타당하다.

2.2 마찰계수와 압력강하

관 내부를 흐르는 유체의 압력 강하는 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

관은 수평 상태로 놓여 있으며 완전 발달된 정상상태에서 실험을 수행하였고 작동 유체는 공기를 사용하였다. 비교적 낮은 압력 하에서의 공기는 근사하게 비압축성 유체로 간주할 수 있으므로 에너지 방정식을 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_1 + \alpha_1 \frac{\rho V_1^2}{2} + \gamma z_1 = P_2 + \alpha_2 \frac{\rho V_2^2}{2} + \gamma z_2 + \gamma h_L \quad (5)$$

입구와 출구의 직경이 일정한 상태($D_1=D_2$)에서 관은 수평이며($z_1=z_2$), 유동이 완전 발달 되었다면($\alpha_1=\alpha_2$, 운동에너지계수) 식 (5)는 $\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma h_L$ 로 간단히 되고, 이를 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 된다⁽³⁾.

$$\gamma h_L = \Delta P = f \frac{l V^2}{D 2g} \quad (6)$$

따라서 값의 측정을 통해 f 를 산출할 수 있으며, 은 마찰손실과 운동량 손실 등 모든 손실을 포함하므로는 관내부로 흐르는 유체의 모든 손실을 포함한다고 할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 장치 및 측정방법

전체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같으며 측정 장비는 Furness Controls사의 FCO012 micromanometer (accuracy $\pm 0.5\%$)와 FCO352 digital pressure sensor (accuracy $\pm 0.25\%$)를 사용하였다. 실험에 사용된 주름관은 (주)동아금속주름관의 제품으로 0.2 mm stainless steel plate를 가공하여 제작된 것이며 그 제원은 Table 1에 명시하였다. Fan Blower를 통해 작동유체(건공기)를 주입하며, 이때 주름관으로 흘러 들어가기 전까지 적절한 길이(30D)를 확보하여 유동을 충분히 발달시키고 Fan blower와 주름관 입구 중간영역 5개 위치의 유동장 측정을 통하여 유동이 발달된 위치를 확인하였다. 발달된 공기는 micromanometer를 통해 관내부에서의 부분별 속도를 측정하여 전체적인 속도장을 파악하게 된다. 실험 장치는 수평으로 연결되어 있고 주름관과 Fan blower를 연결해 유량 데이터를 측정

Table 1. The specification of flexible metal tubes.

type	name	inner diameter (mm)	outer diameter (mm)	pitch (mm)
Annular	A10A	10.5	13.6	4
	A15A	14.4	17.5	4.76
	A20A	15.7	20.3	5.26
	A25A	20.2	25.6	4.69
	A32A	27.1	31.8	5.08
Helical	H15A	14.0	17.9	5
	H20A	21.2	25.7	5.56
	H25A	27.3	32.7	6.25
	H32A	34.1	39.6	6.25
	H40A	42.5	49.6	6.25

하는 직관은 원형이다. 유동은 충분한 시간이 흘러 정상상태이므로 관의 중심으로부터 벽면까지 축대칭으로 가정할 수 있다. 따라서 취득한 속도 데이터를 식 (2)와 같이 유동 단면에 대해 적분하면 관 내부를 흐르는 유량과 평균속도를 구할 수 있다. 정상상태 조건을 형성한 후에는, 원형 관에서 측정한 유량은 실험장치의 관내에서 모두 적용할 수 있다.

사용하는 건공기의 물성값($\rho=1.23 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.79 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$)과 주름관의 제원을 알고 있으므로 주름관을 통과하는 동안 작동 유체의 압력 강하와 속도 데이터를 측정하고 이를 식 (7)에 적용하여 마찰계수를 구하였다.

$$f = \Delta p \frac{D}{l} \frac{2}{\rho V^2} \quad (7)$$

실험 장치의 타당성을 검증하기 위하여 상대 조도를 0으로 볼 수 있는 매끄러운 관(PVC)을 측정하여 기존 Moody Chart와 일치 여부를 확인 하였으며 그 결과를 Table 2에 명시하였다.

3.2 결과 데이터 분석

실험을 통해 얻은 데이터를 통해 주름관의 Reynolds

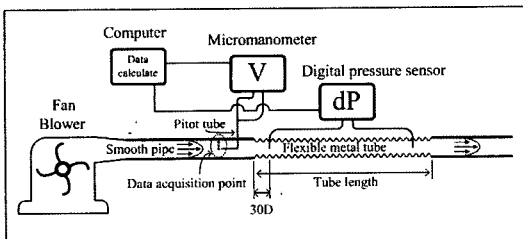


Fig. 3. Experimental apparatus for the measurement.

Table 2. Compare with Moody chart and PVC pipe data.

Reynolds number	Friction factor		A relative error (%)
	Moody chart	Smooth PVC	
8000	0.032	0.031	3.13
18000	0.027	0.0265	1.85
30000	0.0235	0.024	2.13
40000	0.0215	0.022	2.32
57000	0.021	0.02	4.76

Number 대비 마찰계수의 선도를 작성 하였고, 이를 안지름과 바깥 지름의 차이를 토대로 계산된 상대 조도를 사용한 이론상의 Moody chart와 비교하였다. 그 결과 주름관의 데이터는 기존의 직관과는 달리 그 독특한 형상으로 인해 Re수의 증가에 따라 부차적 손실이 상승되어 f값이 계속 증가하는 결과를 나타내었으며 기존 문헌에서도 이와 유사한 결과가 있음을 확인하였다⁽³⁾.

주름관 제작에 사용된 금속관은 평면에 매우 가까우므로 상대조도는 매우 작다고 할 수 있으며, 실험 결과 내경과 외경의 차이를 통해 계산한 상대조도 역시 타당하지 못하다. 따라서 주름관을 통하는 유체의 손실은 단면적 대비 주름부의 면적과 주름의 pitch값이 지배적으로 작용한다는 것을 밝혀내었다.

Fig. 4에 Annular 형태의 주름관에 대한 마찰계수 선도를 나타내었다. 여기서 주목할 점은 A15A와 A20A, A25A의 경우 A20A, A25A가 A15A보다 더 큰 외경과 내경을 가지고 있음에도 불구하고 전체 단면적에서 주름부의 면적이 차지하는 비율은 32.3%(A15A): 40.2%(A20A) : 37.8%(A25A) 로 Re수의 증가에 따른 마찰계수가 오히려 A15A보다 높음을 확인하였다. 이는 전체 손실에서 형상에 의한 손실이 A15A가 다른 관들에 비해 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 이 부분을 고려하기 위하여 각 주름관의 단면대비 주름부의 면적과 pitch값을 Table 3에 정리하였다.

Fig. 5에는 Helical 형태의 주름관에 대한 마찰계수 선도를 나타내었다. Helical 형태의 경우 전체 단면적

Table 3. The corrugation data of each tubes.

	Total area (m ²)	Corrugation area (m ²)	Total/Corrugation (%)	pitch (mm)
A10A	154.3	58.8	40.4	4
A15A	240.5	77.7	32.3	4.76
A20A	323.7	130.0	40.2	5.26
A25A	514.7	194.2	37.8	4.69
A32A	794.2	217.4	27.3	5.08
H15A	251.6	97.7	38.8	5
H20A	518.7	165.8	32.0	5.56
H25A	839.8	254.5	30.3	6.25
H32A	1231.6	318.4	25.8	6.25
H40A	1932.2	513.6	26.6	6.25

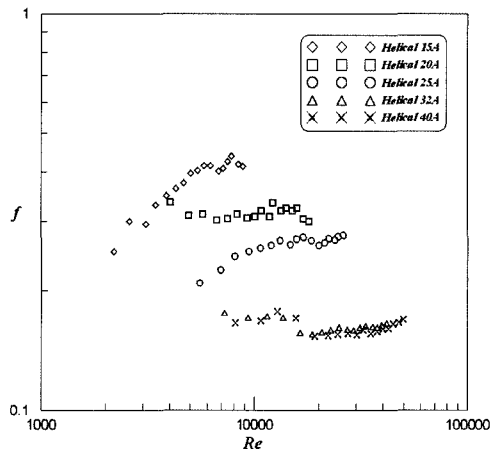


Fig. 5. Friction factor versus Reynolds number for helical type.

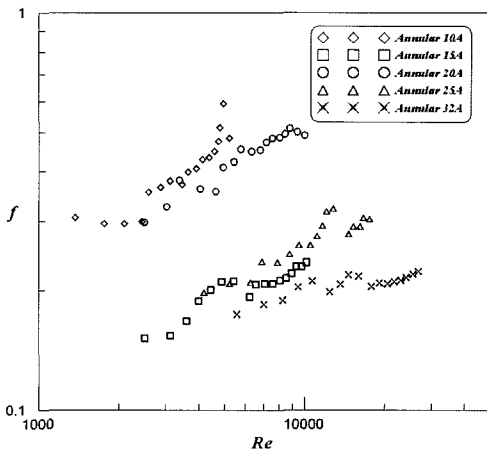


Fig. 4. Friction factor versus Reynolds number for annular type.

이 증가함에 따라 주름부의 면적이 일관성 있게 감소하여 Annular 형태에서와 같은 마찰계수 역전 값은 나타나지 않았다. 하지만 Helical의 경우에도 직경 대비 단면적의 비율이 상대적으로 낮은 H32A와 H40A를 제외하고는 Re수의 증가에 따라 마찰계수는 계속 증가하는 결과를 얻었다. Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 Re수의 증가에 따른 마찰계수의 지속적인 증가는 주름관내에서 유체와 관 벽면과의 점성 마찰에 의한 손실보다는, 주름에 의한 급격한 단면적 변화에 따른 유동의 운동량 손실이 지배적이기 때문이라고 사료된다⁽⁴⁾.

3.3 새로운 선도의 제안

결과를 토대로 분석하면 주름관의 형상적인 특성상

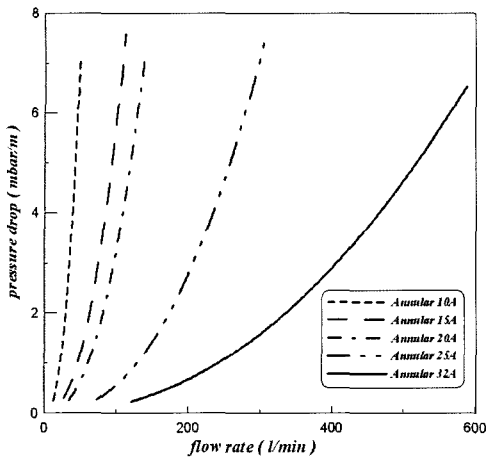


Fig. 6. Pressure drop versus flow rate for annular type.

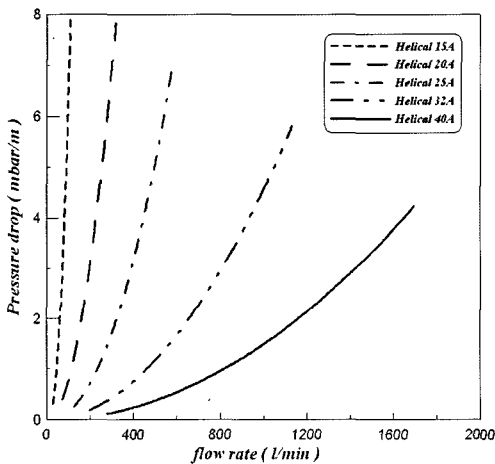


Fig. 7. Pressure drop versus flow rate for helical type.

기존의 Re 와 f 값을 이용한 Moody chart형식의 선도는 실제 설계에 사용하기에는 부적절하다.

관 내부를 흘러나오는 유량의 압력 강하는 그 관을 흐르는 동안의 총체적 손실이라 할 수 있으므로 이를 Fig. 6, 7로 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 주름관 내부를 흐르는 유동장을 측

정하는 실험 장치를 구성하여 10종류의 주름관에 대한 유체역학적 데이터를 확보하였으며 측정 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주름관에 있어서의 마찰손실은 상대조도에 의한 손실보다는 형상에 의한 운동량 손실이 지배적이다.

(2) 부차적 손실을 무시할 수 없으므로 안지름과 바깥지름의 비율로 계산하는 상대조도 개념을 사용하는 것은 바람직하지 않다.

(3) 형상에 의한 부차적 손실에 의하여 각 주름관은 Re 수가 10^3 에서 7×10^4 의 실험조건에서 Re 수의 증가에 따라 마찰계수가 계속 증가한다.

(4) 형상에 의한 손실이 지배적이므로 각 주름관의 마찰 손실은 단면적 대비 주름부의 면적이 넓을수록 증가한다.

(5) 주름관을 사용한 관로 설계 시 형상에 의한 부손실이 지배적이므로 주손실과 부손실을 모두 포함하는 유량대비 압력강하 선도를 10종류의 주름관에 대하여 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 지역대학 우수 과학자 지원(R05-2004-000-11406)과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11264-0)에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- 1) Munson, B., Young, D. and Okiishi, T., 2003, Fundamentals of Fluid Mechanics, Wiley, New York, pp. 567-575.
- 2) Ryu, S. Y., Yoon, J. H. and Lee, D. J., 2001, "Pressure Drop in a Helical Square Duct", Proc. KSME Spring Conference, Vol.E, pp. 398-403.
- 3) Park, J. H., 2004, "Prediction of Flow Behavior and Pressure Drop of Spirally Corrugated Steel Pipe", Korean Society of Computational Fluids Engineering, Vol. 9(2), pp. 18-22.
- 4) Ahn, S. W., Son, K. P. and Shin, S. H., 2001, "Effect of the Groove Type Tubes on Friction Factors in the Annuli", SAREK, Vol. 13(9), pp. 803-809.